

Indicateurs d'état et de prévision de la dynamique de transformation des apports organiques

Laurent Thuriès (1), Sabine Houot (2)

(1) CIRAD « Risque Environnemental Lié au recyclage », 34398
MONTPELLIER Cedex 05

(2) UMR INRA AgroParisTech « Environnement et Grandes Cultures »,
78850 THIVERVAL-GRIGNON



Pourquoi des indicateurs?

- **Utilisateurs :**
 - attentes différentes (amendements, engrais, support de culture...)
- **Producteurs :**
 - connaître ses produits, suivre un process (compostage)
- **Conseillers :**
 - préconiser les bons usages
- **Législateurs :**
 - réglementer les usages, prévenir les problèmes, marché C...
- **Scientifiques :**
 - prévoir à long terme les effets, généricité des travaux

Quels effets prévoir?

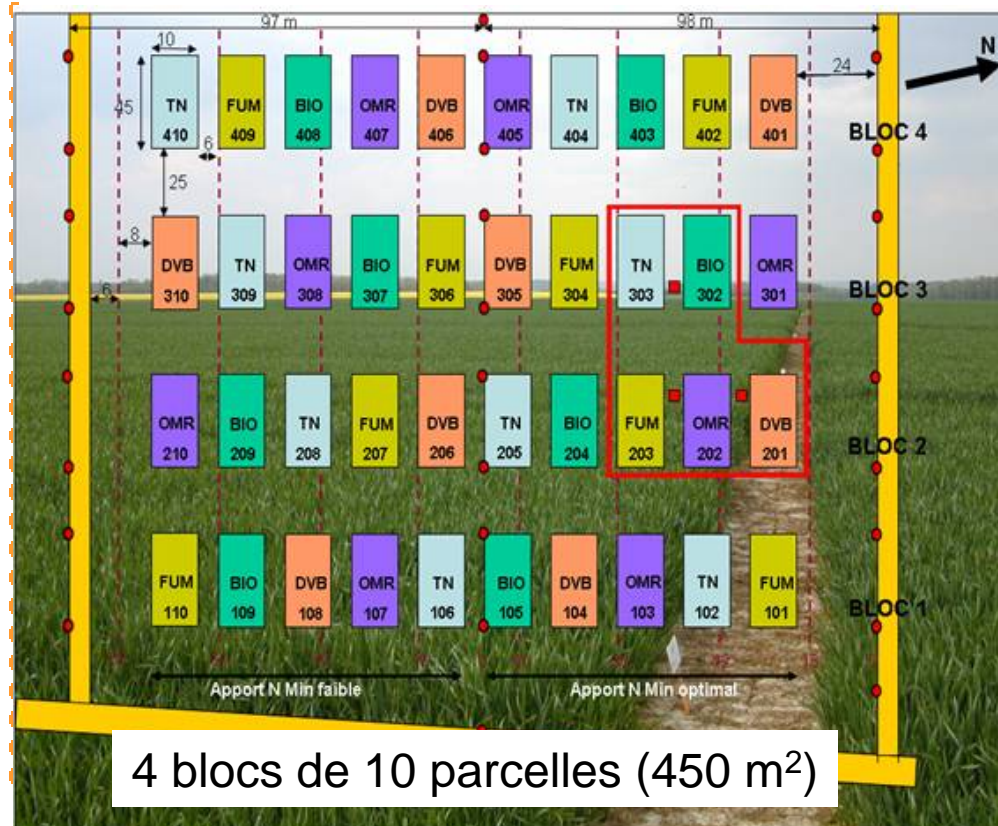
- Dynamique MO et stockage C
- Activité biologique
- Disponibilité éléments fertilisants (N)
- Phytotoxicité
- Risques environnementaux

Exemples d'outils et d'indicateurs disponibles

Méthodes	Indicateurs	Utilisation, Effet
Fractionnement biochimique (XPU 44-162)	Indice de stabilité biologique	Efficacité amendante (MO)
Incubations C (XPU 44-163)	Proportion de C _{org} facilement minéralisable	Effet sur activité biologique
Incubations N (XPU 44-163)	N potentiellement disponible	Valeur fertilisante N
Modélisation	Paramètres du modèle	Prévision C, N...
Test auto-échauffement, Solvita...	Maturité des composts	Gérer le procédé de compostage
Test plantes	Phytotoxicité	Utilisation des composts en support de culture

Valeur amendante des apports organiques

- Mise en évidence de l'efficacité différente des produits
essai INRA-CREED 1998-2012



4 amendements organiques:

- fumier
- c. ordures ménagères résiduelles (OMG ou OMR)
- c. biodéchets (BIO)
- c. déchets verts et boue (DVB)
- témoin

2 niveaux de fertilisation azotée

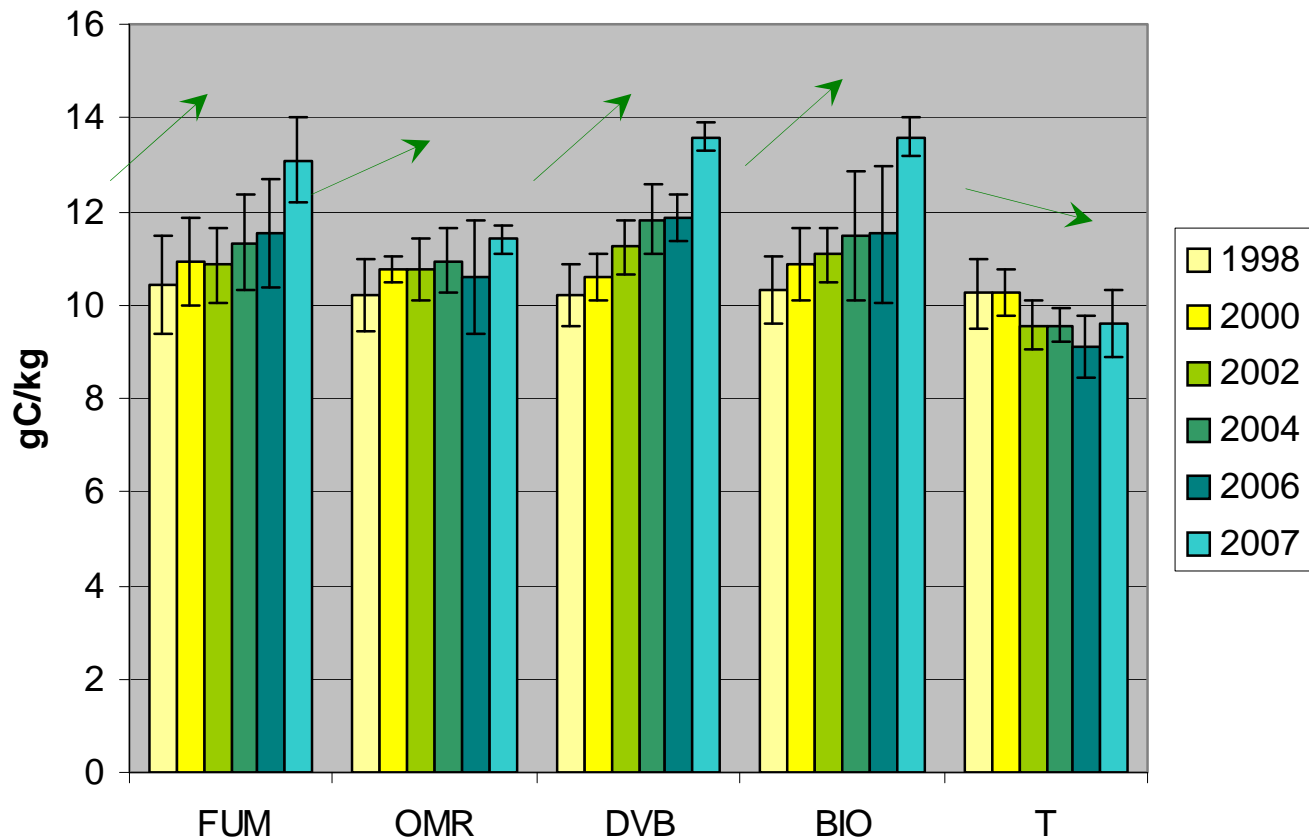
Succession blé - maïs

Épandage tous les 2ans, 4 t C/ha

4 blocs de 10 parcelles (450 m²)

Augmentation des teneurs en MO du sol: variat avec le type de compost

- Augmentation des teneurs en C variable en fonction des apports
- Besoin d'outils pour évaluer l'efficacité des apports et prévoir les évolutions de C



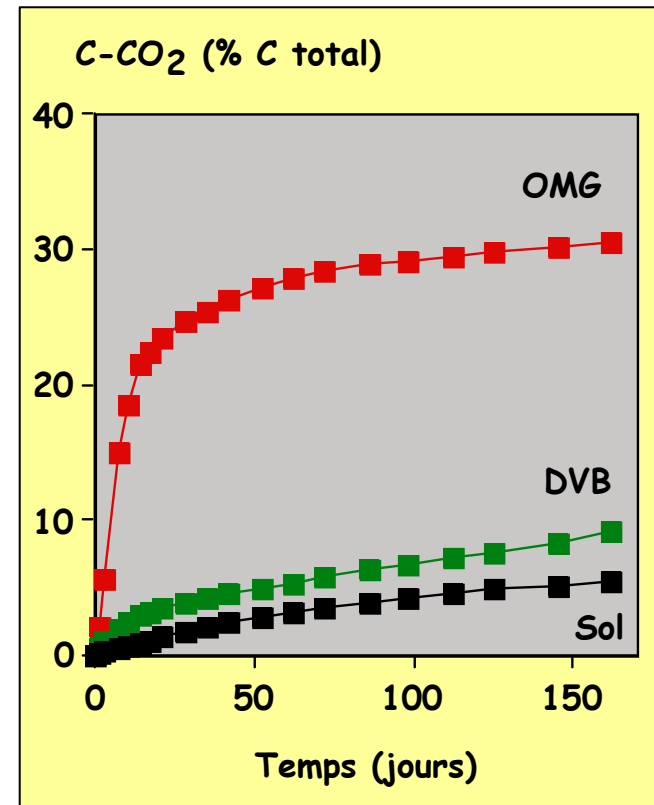
Outils diagnostic analytiques pour évaluer l'efficacité des matières organiques

➤ Les analyses classiques sont insuffisantes

Exemple: 2 composts



- Même teneur en MO: 50%
- Biodégradabilité résiduelle évaluées au cours d'incubations
- Indicateur normalisé (XPU 44-163)



35%

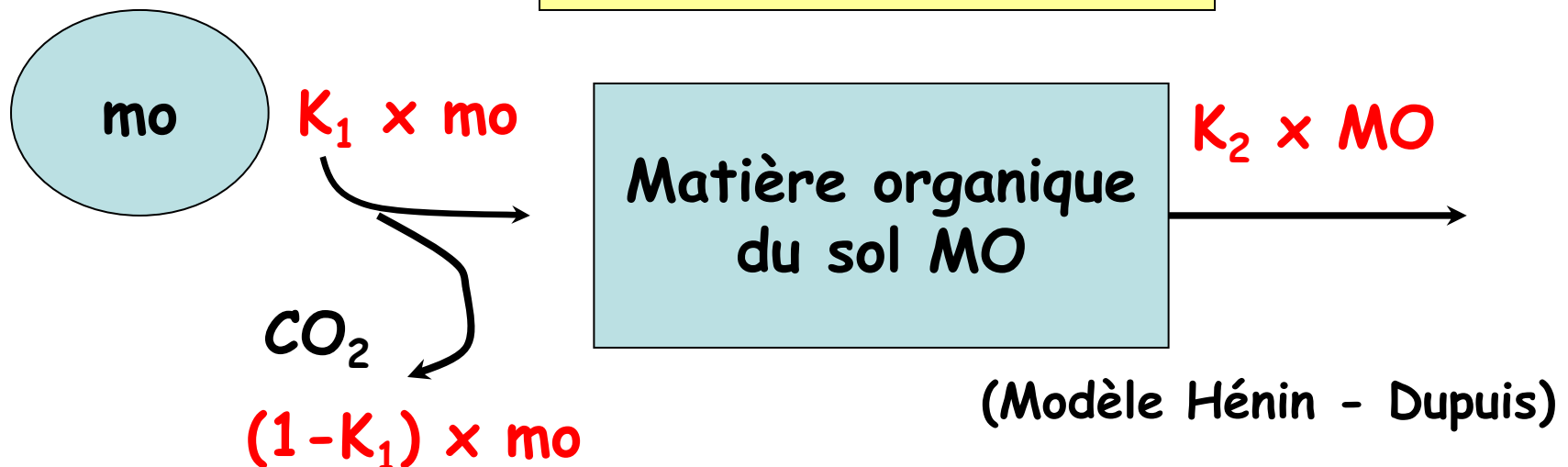
10%

Stabilité = contraire de biodégradabilité

Valeur amendante des apports organiques

- Quelle fraction K_1 de la matière organique apportée (mo) contribue à l'augmentation de la matière organique du sol (MO)?

$$K_1 \times mo \geq K_2 \times MO$$

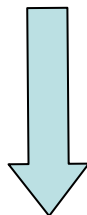


Outils diagnostic analytiques pour évaluer l'efficacité des matières organiques

➤ Définition d'un Indice de Stabilité Biologique

Fractionnement biochimique de la matière organique :

- substances solubles (SOL)
- hémicellulose (HEM)
- cellulose (CEW)
- lignines et cutines (LIC)



$$\text{BSI} = 2.112 - (0.02009 * \text{SOL}) - (0.02378 * \text{HEM}) - (0.02216 * \text{CEW}) + (0.00840 * \text{LIC})$$

proportion de matière organique susceptible d'entretenir le stock de matière organique du sol: estimation du coefficient isohumique K1

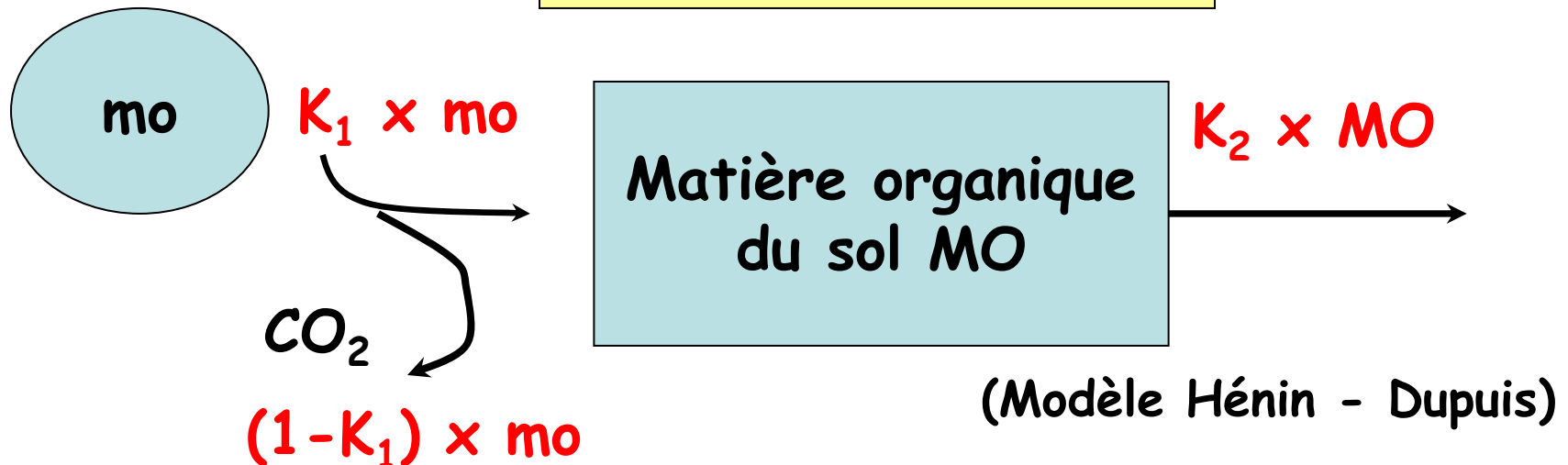
OMG: 33

DVB: 69

Valeur amendante des apports organiques

- Quelle fraction K_1 de la matière organique apportée (mo) contribue à l'augmentation de la matière organique du sol (MO)?

$$K_1 \times mo \geq K_2 \times MO$$



Valeur amendante des apports organiques

Calcul annuel bilan humique (Hénin-Dupuis, 1945):

$$C(t+1) = C(t) - K_2 * C(t) + K_{1PRO} * C_{pro}(t) + K_{1RES} * C_{res}(t)$$

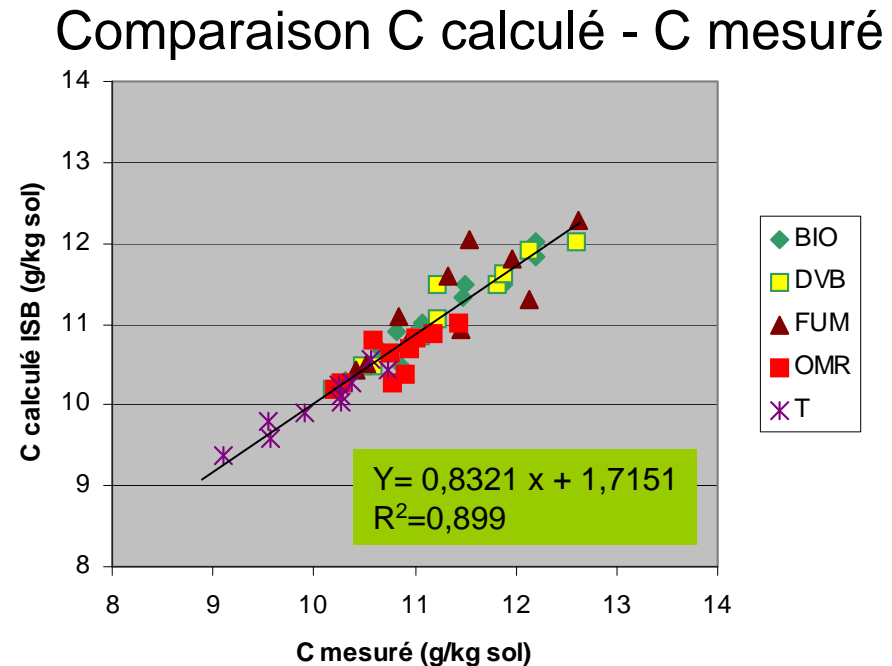
avec
$$K_2 = \frac{0,03 * (1 + 0,2 * (TMA - 10))}{(1 + 0,005 * Arg) * (1 + 0,0015 * CaCO_3)} = 0,0206 \text{ à Feucherolles}$$

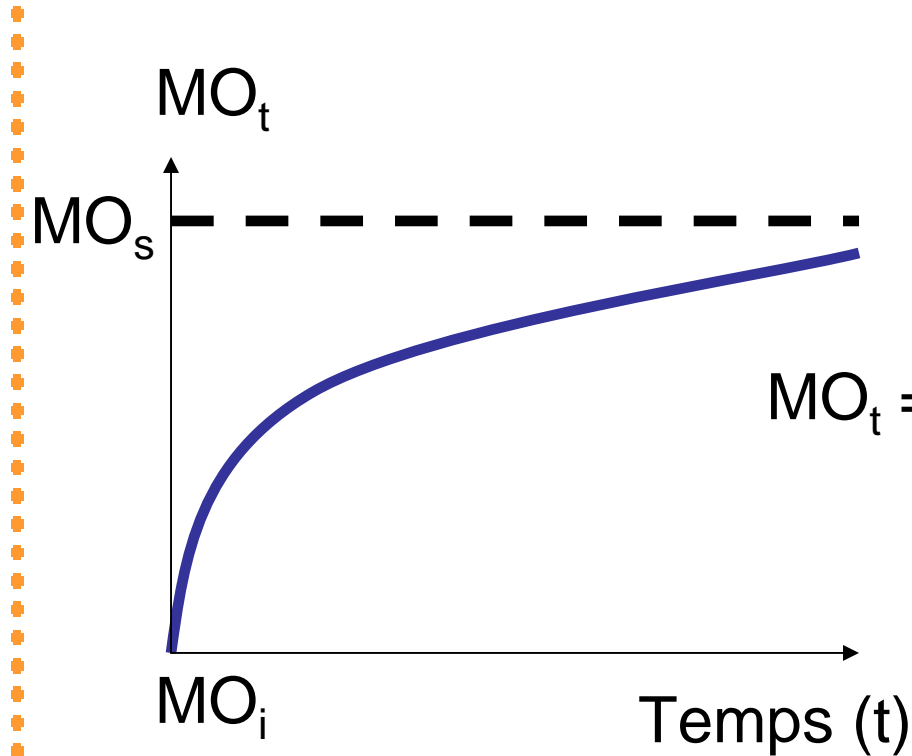
Marin-Laflèche, 1996)

$K_{1RES} = 0,13$ $K_{1PRO} = ISB$ ➡ **Evolution C bien simulée**

Rdt en MO des pro (% du C
apporté en 8 ans)

% C apporté	Simulé	mesuré	ISB
FUM	58	50	52
OMR	34	34	35
DVB	43	46	54
BIO	51	49	56



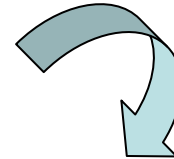
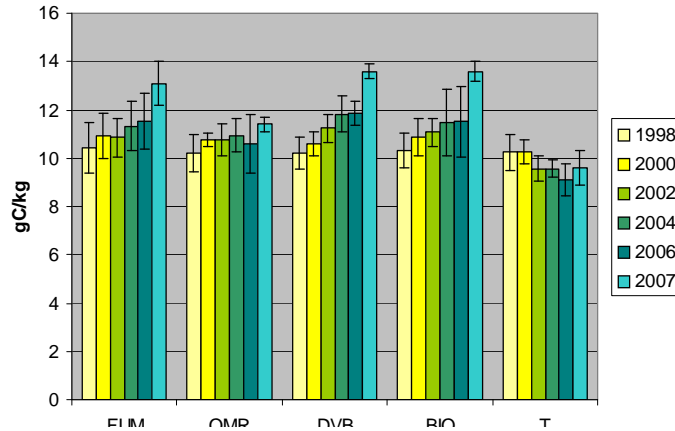


(Modèle Hénin-Dupuis)

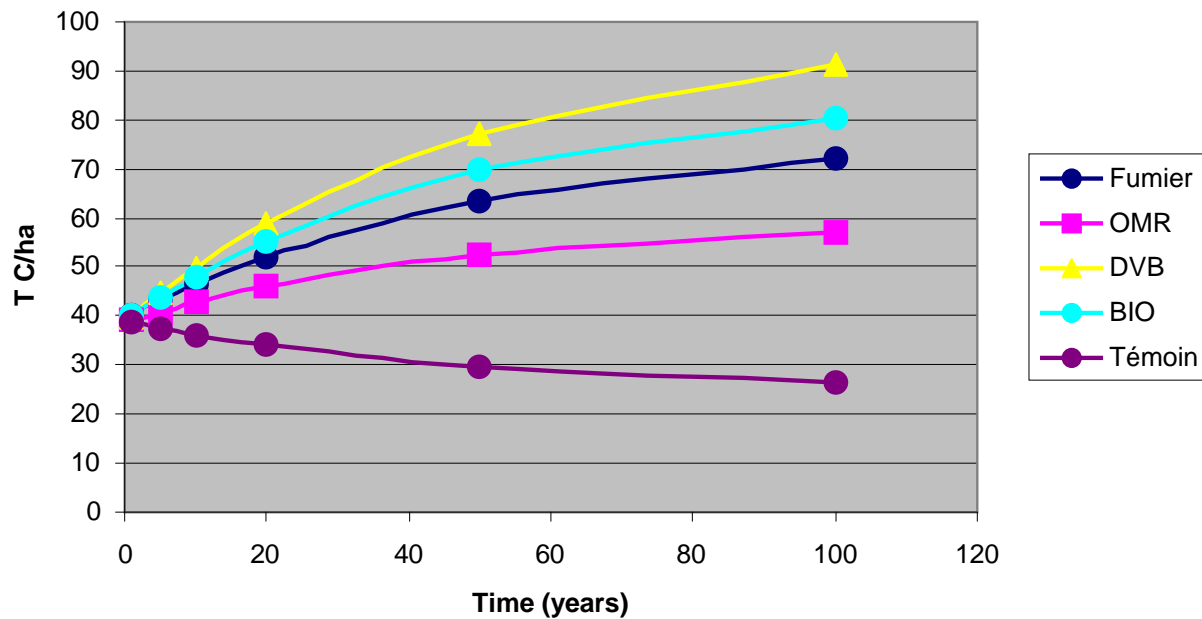
$$MO_t = MO_s - (MO_s - MO_i) \exp(-K_2 t)$$

$$MO_s = \frac{K_1 \times mo}{K_2}$$

Valeur amendante des composts: stockage à long terme



Prédictions à long terme



Hénin-Dupui

Calculs de K1

Produit A

MO sur PBrut = 600 kg t⁻¹

MS sur PBrut = 400 kg t⁻¹

Rendement humus = 60 kg t⁻¹

$K1 = 60/400 = 0,15$



Produit B

MO sur PBrut = 600 kg t⁻¹

MS sur PBrut = 800 kg t⁻¹

Rendement humus = 530 kg t⁻¹

$K1 = 530/800 = 0,66$



Produit C

MO sur PBrut = 500 kg t⁻¹

MS sur PBrut = 750 kg t⁻¹

K1 annoncé = 0,8

Rendement humus = $0,8 \times 750 = 600$ kg t⁻¹



Impossible avec 500 kg MO t⁻¹

- Valeurs de K1

- Difficilement (pas) contrôlable

1. Influence des conditions pédoclimatiques
2. Coût / durée

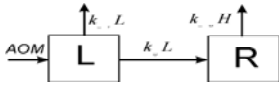
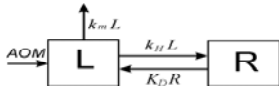
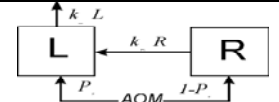
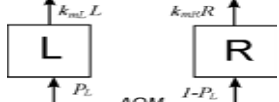
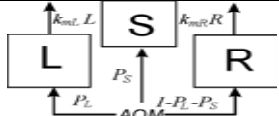
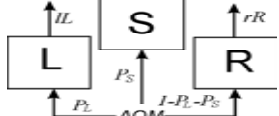
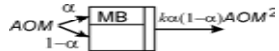
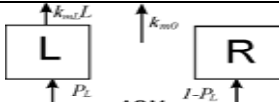
Exemples de calculs de valeur amendante

$$\text{Valeur amendante} = \text{ISB} * \text{MOT}$$

compost	âge	MS (%MB)	MOT (%MB)	Valeur amendante			
				MOT (%MS)	ISB (%MO)	(%MS)	(kg/t MB)
DV	3 mois	68	25	37	75	28	188
	6 mois	71	27	38	76	29	205
BIO	3 mois	65	20	30	50	15	100
	6 mois	65	18	28	65	18	117
OM	3 mois	68	36	53	17	9	61
	6 mois	50	18	35	47	16	85

- Si Augmentation ISB > diminution MOT, alors valeur amendante augmente (cas des composts d'OM qui se stabilisent beaucoup entre 3 et 6 mois)

Autres modèles de transformation des MO ajoutées

N°	Name	Flow AOM = added organic matter	Analytical solution RAOMF at time t	Parameters
m1	Consecutive humification 1 st order 2 CM, 3 parameters		$\frac{(k_{mL} - k_{mR})}{k_{mL} + k_H - k_{mR}} e^{-(k_{mL} + k_H)t} + \frac{k_H}{k_{mL} + k_H - k_{mR}} e^{-k_{mR}t}$	k_{mL}, k_{mR} : 1 st order k. mineralization constants of labile (L) and resistant (R) compartments k_H : humification constant.
m2	Exchange 1 st order 2 CM		$\frac{\lambda_1 + k_m}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 t} - \frac{\lambda_2 + k_m}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_2 t}$	k_H, k_D : humification and decomposition constants, k_m : mineralization constant (λ_1, λ_2 : roots of 2 nd order linear differential equation $f(k_H, k_D, k_m)$)
m3	Consecutive decomposition 1 st order 2 CM, 3 parameters		$\frac{P_L k_m - k_D}{k_m - k_D} e^{-k_m t} + \frac{(1 - P_L)k_m}{k_m - k_D} e^{-k_D t}$	k_D, k_m : decomposition and mineralization constants P_L : labile AOM fraction
m4	Parallel 1 st order 2 CM, 3 parameters		$P_L e^{-k_{mL}t} + (1 - P_L) e^{-k_{mR}t}$	k_{mL}, k_{mR} : see m1 above P_L : see m3 above
m5	Parallel 1 st order 3 CM, 4 parameters		$P_L e^{-k_{mL}t} + (1 - P_L - P_S) e^{-k_{mR}t} + P_S$	k_{mL}, k_{mR}, P_L : see m4 above P_S : stable AOM fraction
m6	Parallel 1 st order 3 CM, 2 parameters		$P_L e^{-lt} + (1 - P_L - P_S) e^{-rt} + P_S$	P_L, P_S : see m4 and m5 above l, h : constants (fixed values of k_{mL} and k_{mR} for all AOM)
m7	2 nd order kinetic model		$\frac{1}{1 + k \alpha (1 - \alpha) t}$	k : 2 nd order kinetic constant, α : fraction of AOM becoming microbial biomass
m8	1 st order plus 0 order model		$P_L e^{-k_{mL}t} + 1 - P_L + k_{m0}t$	P_L, k_{mL} : see m4 above k_{m0} : 0 order kinetic constant

• modèles multicompartimentaux

• prédictions avec 3 CM > 2 CM

• m4 et m5 vers m6 : TAO

(proportions P_L, P_R, P_S : déterminantes // aux vitesses de minéralisation k_{mL} et k_{mR})

Décomposabilité des apports 'a priori': modèles

- Mécanistes (à compartiments fonctionnels)

Ex. Transformations des Apports Organiques (TAO)

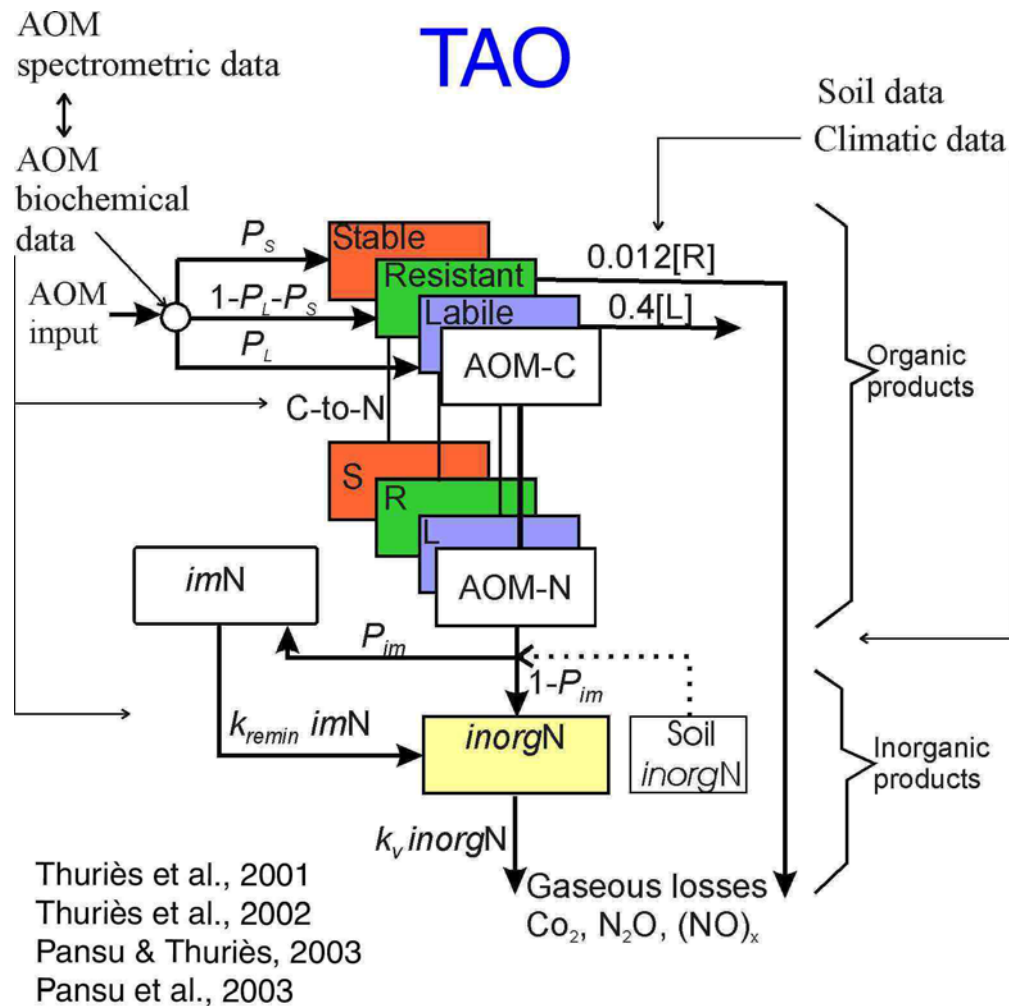
- * 3 compartiments fonctionnels,
- * Echelle de temps : jour, mois (saison)

Intérêts:

- bon pouvoir explicatif,
- comparer les dynamiques d'AO
- entre eux & de couples AO-sols

Produits : des indicateurs

- C (potentiel humique),
- N (potentiel minéralisation)



$$P_L e^{-k_m L t} + (1 - P_L - P_S) e^{-k_m R t} + P_S \quad \text{Avec } k_{mL} = 0.4 \text{ j}^{-1} \text{ et } k_{mR} = 0.012 \text{ j}^{-1}$$

2 jeux d'équations :

f° de la composition des AOM (C et Lig/N) $CO = 0.71 \left(\frac{C - \bar{C}}{s_C} + \frac{LIG/N - \overline{LIG/N}}{s_{LIG/N}} \right)$

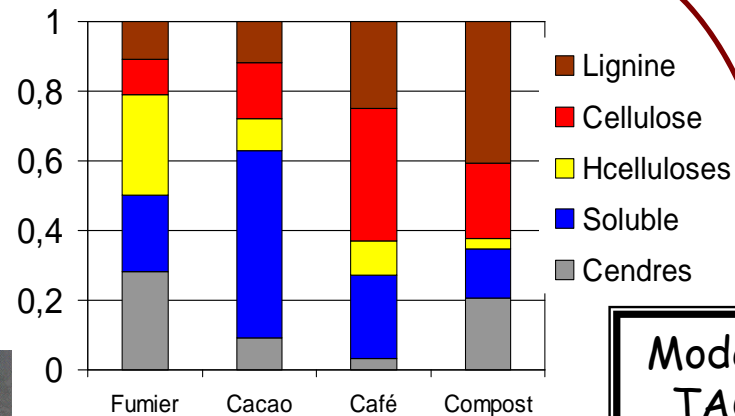
CO

- $PL' = 0.35 f_{sol} + 2.2 N_{AOM} - 0.010 \text{ Lig}/N_{AOM}$
- $PS = 3.63 \text{ Lig}$
- + $PL' = 0.099 f_{lab} + 0.14 \text{ Hem}$
- + $PS = 1.61 \text{ Lig} + 0.62 \text{ Ash}_{AOM}$

Sol, Hem, Cel, Lig, Ash AOM = mass fraction of the organic extracts: soluble, hemicelluloses, cellulose, lignin in AOM, and inorganic part of AOM, respectively,
 NAOM = nitrogen in whole AOM,
 $f_{lab} = (\text{Sol} + \text{Hem}) / (\text{Sol} + \text{Hem} + \text{Cel} + \text{Lig})$,
 $f_{sol} = \text{Sol} / (\text{Sol} + \text{Hem} + \text{Cel} + \text{Lig})$,

- Compartiments fonctionnels = f^q (fractions mesurables)
- Outils 'de laboratoire' (texture, contact sol, faune... difficilement ou peu pris en compte)

biochimie



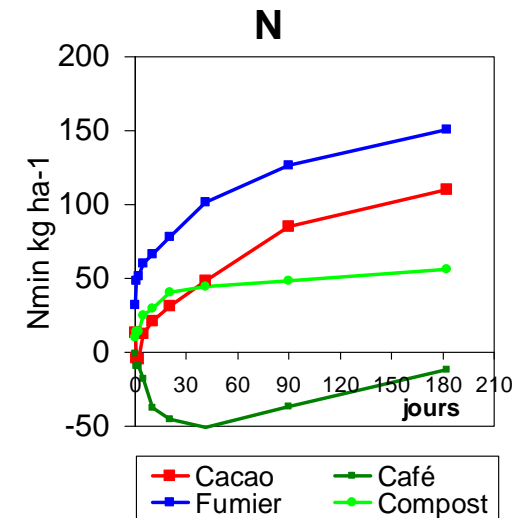
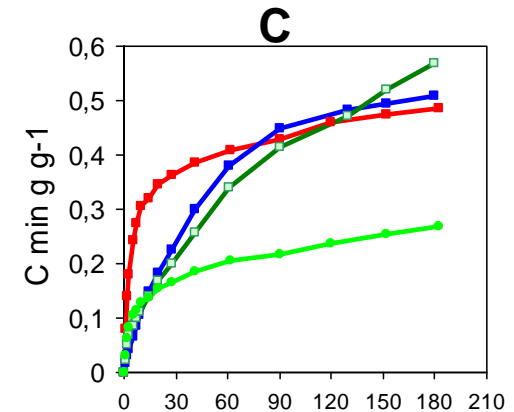
Modèle
TAO

chimie

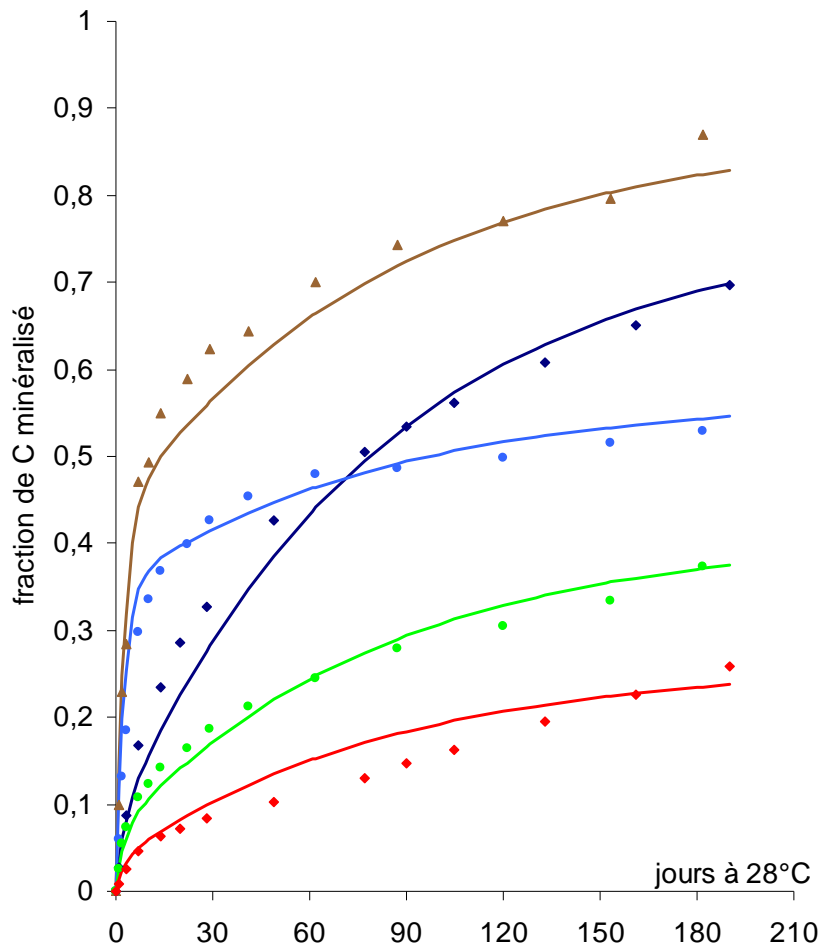
C, N, (silice, métaux?)

physique

biologie



TAO Carbone: de la R&D à la production



▲ SP

Propositions de matières premières :
tri, usages possibles, rejet

— p_SP

◆ A

Amendements organiques:
- suivi du compostage
- création articles

— p_A

● EV

Engrais organiques:
- calculs en formulation

— p_EV

● BA

— p_BA

◆ I

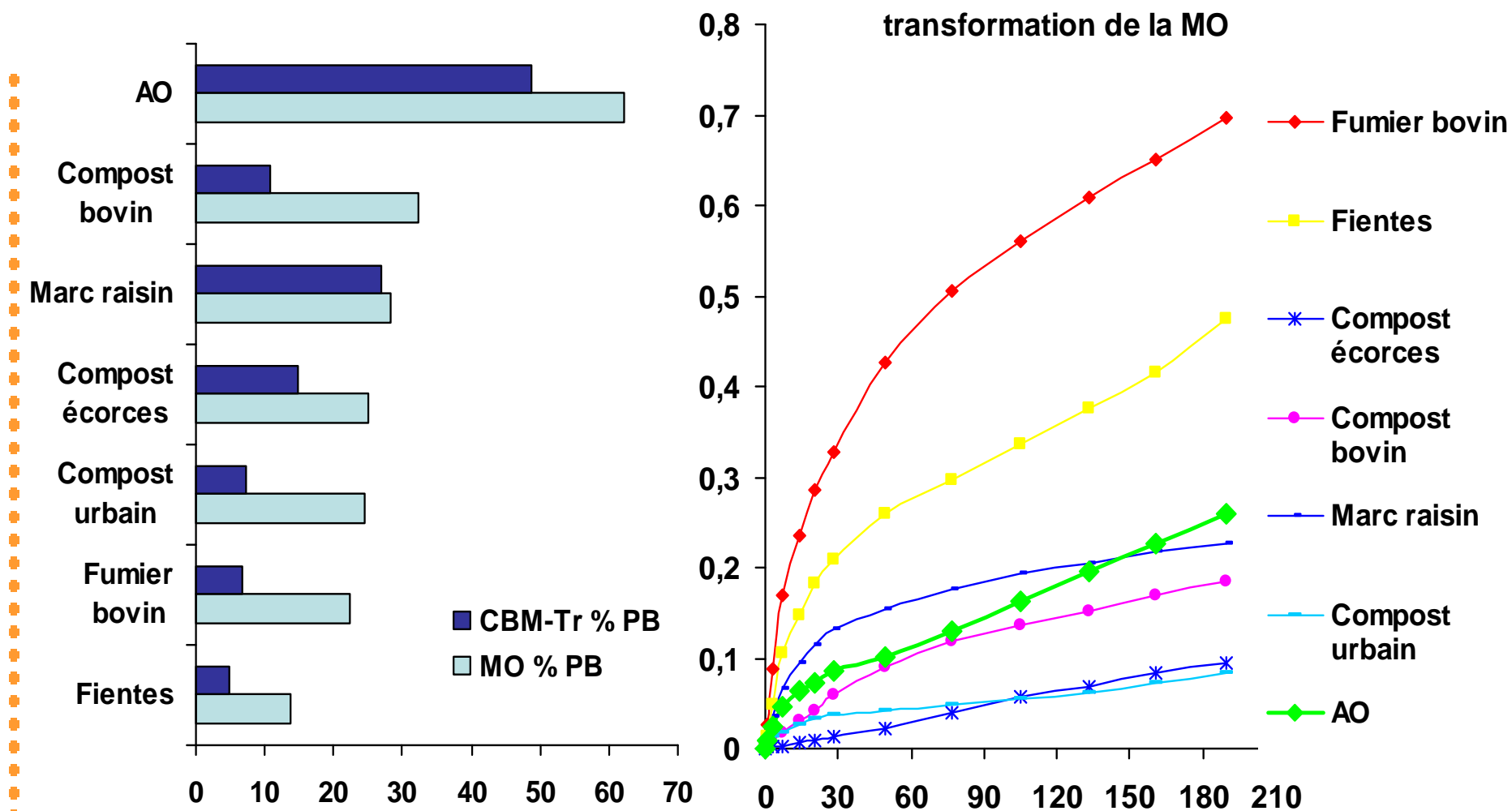
— p_I

Utilité en fabrication (Exemples Phalippou-Frayssinet)

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?															
Tapez une question															
Arial 10 G I S															
Q1	fx														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1															
2															
3					Entrée par les teneurs exprimées en %PB (et MS%PB)										kg/t PB
4					% Produit Brut										
5			nature	nom	MS	MO	SOL	HCEL	CEL	LIG	CEW	ISB	Tr	humus	somme
6			Autre Matière Première	Fumier de bovin	26,2	22,3	5,4	5,62	8,9	2,2			6,8	68	22
7			Autre Matière Première	Tourteaux d'oeillette	40,7	34,9	17,4	6,4	7,4	3,7			11,3	113	35
8			Produit PF	BIOMASSE	51,0	41,7	12,7	3,6	12,5	12,8			28,1	281	42
9			Produit PF	VEGEPLAN	78,4	46,3	9	3	14	22			30,6	306	46
10			Produit PF	RICHUMUS	84,0	71,6	24	10	15	23			46,2	462	72
11			Produit PF	BACTOR	72,0	58,2	17,1	3,9	12,2	25,0			47,4	474	58
12			Produit PF	100%	78,5	62,3	18	6	11	28			48,8	488	62
13			Produit PF	VEGETHUMUS	81,0	64,0	14,8	3,5	13,0	32,6			57,7	577	64
14			Produit PF	REPULSSOR	66,3	57,5	26,0	8,9	7,8	14,7			30,5	305	57
15			Produit PF	VEGEVERT	80,2	67,1	28,2	3,4	15,6	19,8			46,0	460	67
16			Matière Première PF	TOURTEAUX DE CAFE	40,80	40,6	10,5	2,4	15,2	12,2			34,6	346	40
17			Matière Première PF	FUMIER DE BERGERIE	63,70	46,0	10,6	2,2	12,5	20,7			36,1	361	46
18			Matière Première PF	PULPES D'OLIVE	92,41	84,9	28,0	14,2	19,0	22,7			50,5	505	84
19			Matière Première PF	COQUES DE CACAO	89,50	81,9	41,3	8,86	15,8	15,0			42,3	423	81
20			Matière Première PF	TOURTEAUX DE CACAO	89,15	80,4	41,8	8,5	11,1	18,3			44,8	448	80
21			Matière Première PF	TOURTEAUX DE SOJA	86,16	79,6	43,4	24,0	7,2	5,4			11,1	111	80
22			Autre Matière Première	Fientes de Poules	85,15	58,1	28,5	13,5	9,2	6,4			12,7	127	58
23			Autre Matière Première	Fientes de Cailles	43,35	35,0	25,7	5,1	4,2	0,8			7,3	73	36
24			Autre Matière Première	Tourteaux de colza	87,88	80,9	57,0	7,1	10,2	6,6			30,2	302	81
25			Matière Première PF	GUANO D'OISEAUX	78,23	51,5	42,6	7,1	0,1	1,6			8,2	82	51
26			Autre Matière Première	Fientes de volailles sur paille	18,82	13,6	4,91	2,5	2,9	2,5			4,8	48	13
27			Autre Produit	Compost de déchets verts	41,12	26,7	13,66	1,7	3,5	5,7			10,9	109	25
28			Autre Produit	Compost d'écorces sans urée	45,84	25,1	4,64	0,2	6,7	10,8			14,7	147	22
29			Autre Produit	Fumier de bovin composté	57,23	32,4	14,90	2,4	7,9	5,3			10,9	109	31
30			Autre Produit	Compost de boues	46,40	29,6	12,01	1,6	6,0	5,0			10,7	107	25
31			Autre Produit	Marc de raisin composté	59,35	34,6	22,4	0,0	2,4	9,7			16,2	162	35
32			Autre Produit	Compost d'ordures ménagères	47,05	24,5	8,83	2,3	5,0	4,7			7,3	73	21
33			Autre Matière Première	Coques de tournesol	85,54	82,2	14,88	14,5	33,7	19,1			51,3	513	82
34			Autre Matière Première	Ecorces broyées (pin maritime)	41,39	39,9	3,29	0,0	11,4	25,2			54,4	544	40

- Tableur ComparHumus™ (contrôle, alerte) / Matières premières, produits finis, concurrence

Potentiel d'humification et son expression



- AO à teneur en MO \equiv peuvent avoir des potentiels d'humification \neq
- La notion d'expression du potentiel est importante (Cf. compost urbain vs fumier)



MERCI ZOT TOUT!